

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Adrijan Beljak

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Adrijan Beljak

Zagreb, 2015



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Adrijan Beljak** Mat. br.: 0035179862

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Produljenje trajnosti kalupa za injekcijsko prešanje polimernih materijala postupcima prevlačenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Extending the durability of molds for injection molding of polymeric materials by the coating processes**

Opis zadatka:

Za produljenje trajnosti različitih strojnih dijelova i dijelovi alata pored klasične toplinske obrade (kaljenja i popuštanja) provode se i postupci modificiranja i prevlačenja površina. Kalupi za injekcijsko prešanje polimernih materijala primjenjuju se u visokoserijskoj proizvodnji različitih proizvoda, a u radu su izloženi kompleksnom utjecaju različitih naprezanja (mehaničkih, toplinskih, korozivskih, tribološkom trošenju, i dr.). Kako su takvi kalupi ponekad vrlo složeni, a samim time i vrlo skupi, produljenjem trajnosti takvih kalupa primjenom postupaka modificiranja i prevlačenja površina mogu se ostvariti značajne uštede.

U teorijskom dijelu rada iz literature istražiti pregled postupaka modificiranja i prevlačenja primjenjivih kod alata za injekcijsko prešanje polimernih materijala. Posebno navesti mogućnost primjene različitih slojeva dobivenih primjenom postupka PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition).

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je:

- primjenom GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectrometry) metode napraviti kvantitativnu kemijsku analizu različitih slojeva.
- primjenom kalotesta odrediti debljinu slojeva.

Za navedena ispitivanja koristiti laboratorije Zavoda za materijale.

Zadatok zadan:

25. studenog 2014.

Zadatok zadan:

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Božidar Matijević

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno uz korištenje navedene literature, znanja stečenog tokom studija i uz pomoć mentora.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Božidaru Matijeviću na stručnom vođenju kroz izradu završnog rada te na pruženoj pomoći i korisnim savjetima za izradu rada.

Adrijan Beljak

Sažetak

U radu su opisani postupci i tehnologije koje se koriste u svrhu poboljšanja trajnosti kalupa za injekcijsko prešanje polimera. Prikazani su i objašnjeni dijelovi kalupa za injekcijsko prešanje kao i sam postupak prešanja. Analizirani su postupci modificiranja i prevlačenja površina, njihove primjene i karakteristike. Detaljnije su opisani postupci prevlačenja površina posebice postupak prevlačenja PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition). Slojevi dobiveni PACVD postupcima prevlačenja su detaljno objašnjeni kao i njihove karakteristike i primjena. U eksperimentalnom dijelu ispitivani su dijelovi kalupa za injekcijsko prešanje polimera s svrhom produljenja trajnosti istih. Dva uzorka su prevučena PACVD postupkom prevlačenja slojevima TiCN i TiBN. Mjerenjem kalotesterom ustanovljenje su debljine nanešenih prevlaka. Provođenjem GDOES analize dobiven je uvid u atomsku i masenu raspodjelu elemenata po dubini prevučenog uzorka.

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
2. KALUPI ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERNIH MATERIJALA.....	2
2.1. Kalupna šupljina	3
2.2. Kućište kalupa	3
2.3. Sustav za ulijevanje i ubrizgavanje.....	4
2.4. Sustav za odzračivanje kalupa	5
2.5. Sustav vađenja otpreska iz kalupa	5
2.6. Tijek procesa injekcijskog prešanja.....	6
2.7. Materijali za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimera.....	7
3. POSTUPCI POVRŠINSKE OBRADJE MATERIJALA	9
3.1. Mehaničko modificiranje površine	11
3.2. Toplinsko modificiranje površine	11
3.3. Toplinsko-kemijsko modificiranje površine	12
3.4. Toplinsko prevlačenje.....	12
3.5. Mehaničko prevlačenje	12
3.6. Toplinsko-mehaničko prevlačenje.....	13
3.7. Kemijsko prevlačenje	13
3.8. Elektrokemijsko prevlačenje	13
4. POSTUPAK PREVLAČENJA U PARNOJ FAZI.....	14
4.1. Prevlačenje u parnoj fazi-CVD.....	14
4.2. Prevlačenje u parnoj fazi-PVD	17
4.3. Plazmom potpomognuto prevlačenje-PACVD.....	19

5.	SLOJEVI DOBIVENI PRIMJENOM PACVD POSTUPKA I NJIHOVA PRIMJENA.....	21
5.1.	Titan nitrid (TiN)	21
5.2.	Titan bor nitrid (TiBN)	22
5.3.	Titan karbo nitrid (TiCN)	23
5.4.	DLC (engl., Diamond like carbide)	24
6.	EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA KALUPA	25
6.1.	Prikaz i parametri postupka prešanja	26
6.2.	PACVD postupak prevlačenja uzoraka	29
6.3.	Mjerenje debljine prevlake primjenom kalotesta	30
6.4.	Princip rada kalotestera.....	30
6.5.	Izračun i rezultati mjerenja debljine prevlake	32
6.6.	Kvantitativna kemijska analiza GDOES metodom	34
7.	ZAKLJUČAK.....	36
8.	LITERATURA	37

Popis slika:

Slika 1: Shematski prikaz uređaja za injekcijsko prešanje polimera	2
Slika 2: Primjer bakrenog kalupa za injekcijsko prešanje plastomera	8
Slika 3: Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina	9
Slika 4: Prikaz provođenja CVD postupka	15
Slika 5: Prikaz PVD postupka prevlačenja	17
Slika 6: PACVD postrojenje	19
Slika 7: TiN prevlaka na reznim alatima	21
Slika 8: Primjer primjene TiBN prevlake	22
Slika 9: Prikaz strojnog dijela prevučenog TiCN prevlakom	23
Slika 10: Dijelovi motora prevučeni DLC prevlakom	24
Slika 11: Kalup za injekcijsko prešanje polimernih komada	26
Slika 12: Umetak kalupa	27
Slika 13: Konačni izradak	27
Slika 14: Stroj za prešanje BUCHER 160t.....	28
Slika 15: Kalotester za mjerenje debljine slojeva prevlake.....	30
Slika 16: Mjerenje debljine prevlake	31
Slika 17: Prikaz načina izračuna debljine prevlake	32
Slika 18: Raspored masenog udjela elemenata po dubini prevučenog uzorka D3.....	34
Slika 19: Raspored atomskog udjela elemenata po dubini prevučenog uzorka D3	35

Popis tablica:

Tablica 1: Kemijski sastav čelika K110	29
Tablica 2: Prikaz parametara prevlačenja uzoraka	29
Tablica 3: Debljine prevlaka dobivene postupkom prevlačenja	33

1. UVOD

Upotreba polimernih materijala za injekcijsko prešanje zauzima sve veći udio u industriji, te se u različitim granama industrije pokazala kao isplativa investicija. U cilju zadovoljavanja mehaničkih, konstrukcijskih ali i financijskih zahtjeva upotreba polimernih materijala je u većini situacija isplativija i jednostavnija nego upotreba drugih zamjenskih materijala.

Za dobivanje željenih oblika prilikom prešanja koriste se kalupi za injekcijsko prešanje polimera koji su posebno konstruirani kako bi zadovoljili uvjete eksploatacije i samog postupka izrade odljevka. Pravilna konstrukcija kalupa je od velike važnosti ne samo zbog točnosti konačnog dijela već i zbog tijeka izrade, temperatura i načina rasprostiranja taline unutar kalupa. Kalup mora zadovoljavati geometrijske kao i mehaničke zahtjeve koji se pred njega postavljaju [14].

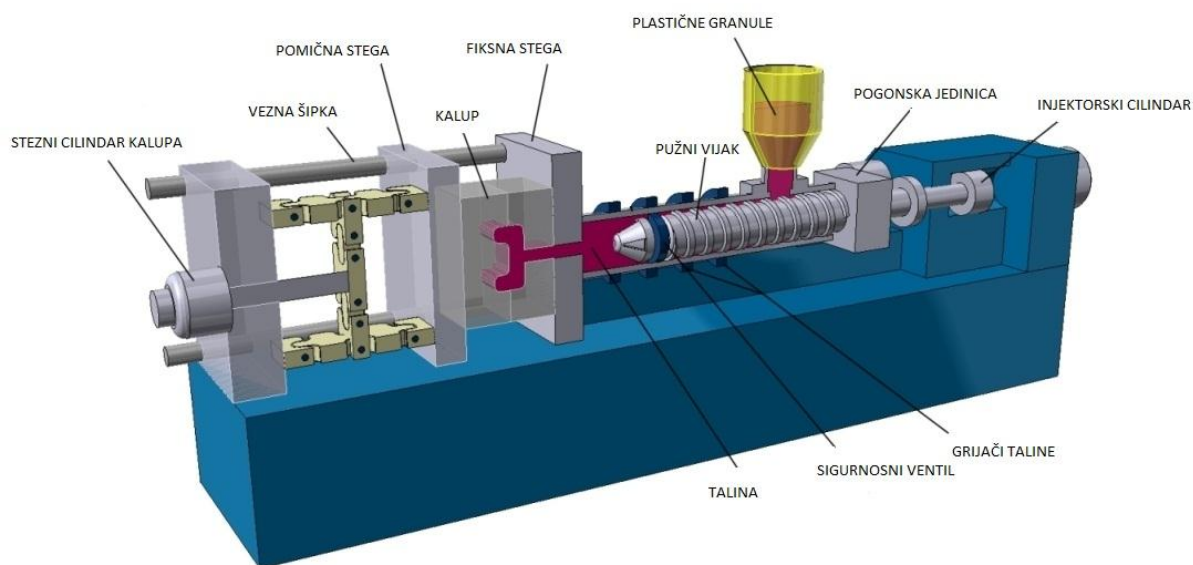
Jedan od glavnih problema kalupa za injekcijsko prešanje je trošenje. Povećanim brojem ciklusa lijevanja povećava se trošenje kalupa. Trošenjem kalupa dolazi do promjena dimenzija koje u konačnici rezultiraju neispravnim odljevkom što je svakako nedopustivo. U cilju produljenja trajnosti i smanjenja potrošnje, kalupi se podvrgavaju postupku prevlačenja. Različitim postupcima prevlačenja poboljšava se trajnost i postojanost kalupa te se samim time eksponencijalno i povećava isplativost cijelog kalupa i postupka izrade.

Prilikom postupaka prevlačenja velika pažnja se pridodaje elementima koji se u postupku prevlačenja koriste. Cjelokupna financijska isplativost je također jedan od bitnijih faktora koji se uzimaju u obzir.

U radu je prikazan način produljenja trajnosti kalupa, postupci i uređaji koji se koriste u tom procesu.

2. KALUPI ZA INJEKCIJSKO PREŠANJE POLIMERNIH MATERIJALA

Kalup za injekcijsko prešanje polimera je glavni element cjelokupnog sustava za injekcijsko prešanje prikazanog na slici 1. Zajedno sa ostalim dijelovima sustava kao što su kalupna šupljina, kućište kalupa i uljevni sustav čini zajedničku cjelinu. Cilj cijelog sklopa kalupne šupljine je postizanje funkcionalne cjeline koja zadovoljava unaprijed postavljene zahtjeve. Konstrukcija kalupa može biti vrlo komplicirana i izrađena od nekoliko elemenata što automatski poskupljuje cjelokupnu izradu kalupa kao i cijenu konačnog proizvoda. Stoga se prilikom izrade i konstrukcije kalupa teži tome da izvedba kalupa zadovoljava sve zahtjeve uz što jednostavniju kompleksnost izrade. Cilj je postizanje konstrukcije kalupa koja zadovoljava što više funkcija prešanja uz što manji broj elemenata. Velika pozornost se posvećuje izvedbi kalupa stoga jer je kalup jedan od najvažnijih elemenata sustava za injekcijsko prešanje. Ukoliko dođe do otkazivanja nekog od elemenata iz sustava prešanja, kalup se lako može premjestiti na novu radnu jednicu i nastaviti sa proizvodnjom bez velikih gubitaka. Ako se kvar nalazi na kalupu cjelokupna proizvodnja staje [15].



Slika 1: Shematski prikaz uređaja za injekcijsko prešanje polimera [17]

Cijena kalupa može doseći iznose i do nekoliko desetaka tisuća eura, ovisno o kompleksnosti otpreska. Rijetko kada u proizvodnji postoji više istih kalupa, te ukoliko dođe do oštećenja to automatski rezultira prestankom proizvodnje. S gledišta financijske isplativosti kalupi za injekcijsko prešanje su poprilično skupi. No kvalitetnom izvedbom kalupa i velikim serijama proizvodnje moguće je postići malu cijenu otpreska, što u konačnici rezultira jako dobrim plasmanom proizvoda na tržište.

2.1. Kalupna šupljina

Kalupnom šupljinom definiramo prostor kojeg zatvaraju dijelovi kalupa. Dijelovi kalupa mogu biti pomični i nepomični ovisno o izvedbi. Kalupna šupljina definira izgled i dimenzije otpreska te su same dimenzije kalupne šupljine uvećane za određeni iznos zbog termičkog skupljanja otpreska prilikom samog procesa prešanja. Kalup može imati više kalupnih šupljina što znači da je istovremeno moguće proizvoditi više otpresaka. Slaganje kalupnih šupljina je iznimno važno te je cilj postizanje ujednačene putanje taline do svake kalupne šupljine uz što manje otpada. Isto tako ujednačenom putanjom taline smanjuje se vrijeme prešanje što je svakako prednost [14].

Zahtjevi koje kalupna šupljina mora zadovoljiti su:

- održati konstantan tlak i temperaturu u kalupnoj šupljini,
- pravilno razdijeliti talinu po kalupnim šupljinama (ukoliko kalup ima više od jedne kalupne šupljine),
- definirati kvalitetu površine i izgled otpreska,
- točno i precizno definirati geometrijski oblik i dimenzije otpreska.

2.2. Kućište kalupa

Glavna zadaća kućišta kalupa je povezivanje nosivih stranica kalupa u zajedničku cijelinu koja čini konstrukciju kalupa. Kućište kalupa mora ispunjavati zadane zahtjeve kao što su prijenos i prihvat sila opeterećenja, prihvat kalupa na sustav ubrizgavanja, povezivanje svih dijelova kalupa u cijelinu. Konstrukcija kućišta mora biti takva da omogućuje jednostavno i brzo pričvršćivanje kalupa na sustav ubrizgavanja. Zbog toga je od iznimne važnosti upotreba kvalitetnih materijala za izradu kućišta kalupa.

Kućišta kalupa se prema izvedbi dijele na :

- pravokutna kućišta,
- okrugla kućišta,
- kućišta za posebnu primjenu.

S obzirom na izvedbu kalupa postoje dva dijela koji se nazivaju pomični i nepomični dio kućišta kalupa. Pomični dio se nalazi na strani gdje se kalup otvara i zatvara, dok se nepomični dio nalazi na strani spajanja sa sustavom ubrizgavanja. Kalup se zajedno sa kućištem steznim pločama pričvršćuju na kućište ubrizgavalice. Prilikom pričvršćivanja uz pomoć osi za centriranje vrši se poravnanje dvaju dijelova kalupa. Poravnanje mora biti iznimno precizno kako u kasnijem procesu prešanja ne bi došlo do pomaka ili neželjenih defekata u otpresku. Cjelokupni sklop kućišta kalupa s nepomičnim i pomičnim dijelom je stegnut steznim pločama i vijcima kako bi se osigurala nepropusnost i cijelovitost cijelog sklopa [14].

2.3. Sustav za ulijevanje i ubrizgavanje

Sustav za ulijevanje ima osnovnu zadaću transporta i razdjeljivanja taline po kalupnoj šupljini. Ukoliko je uljevni sustav kvalitetno dimenzioniran i zamišljen tok taljevine prema kalupnoj šupljini je sveden na minimalno vrijeme. Isto tako kvaliteta otpreska, količina otpada i eventualni nedostaci u otpresku su direktno vezani na uljevni sustav.

Sustav za ulijevanje se dijeli na tri osnovna sustava:

- čvrsti uljevni sustav,
- kapljeviti uljevni sustav,
- čvrsti i kapljeviti uljevni sustav.

Čvrsti uljevni sustav je konstruiran na taj način da se sastoji od jednog ili više uljevnih kanala koji su međusobno povezani u cijelinu. Čvrsti uljevni sustav se izvodi u dva osnovna načina i dijeli se na uravnoteženi i neuravnoteženi uljevni sustav. Kod uravnoteženog uljevnog sustava talina jednako vremenski putuje do svake kalupne šupljine te je put tečenja između kalupnih šupljina jednak. U slučaju neuravnoteženog uljevnog sustava talina do kalupne šupljine ne teče jednakim putevima kao što je to slučaj kod uravnoteženog uljevnog sustava. U uravnoteženom uljevnom sustavu popunjavanje kalupne šupljine je jednako dok kod neuravnoteženog uljevnog

sustava to nije slučaj. Također u neuravnoteženom uljevnom sustavu dolazi do različitog temperiranja otpresaka zbog različitih putova taline.

Glavni nedostatak ove vrste uljevnog sustava je velika količina otpadnog materijala koja u velikim serijama proizvodnje može znatno utjecati na cijenu konačnog proizvoda.

Zbog navedenog nedostatka čvrstog uljevnog sustava koristi se kapljeviti uljevni sustav. Upotrebom kapljevito uljevnog sustava smanjuje se količina otpadnog materijala, povećava se kvaliteta tečenja kao i efikasnost cijelog uljevnog sustava. Prednosti kapljevito uljevnog sustava su jednostavnija automatizacija ciklusa, manji pad tlaka u uljevnom sustavu, ušteda materijala i troškova, kraće vrijeme uljevanja kao i kraći ciklus prešanja. Nedostatci kapljevito uljevnog sustava su loša izmjena topline u kalupu, visoka cijena kalupa, potrebno dulje vrijeme za izradu i konstruiranje kalupa [14].

2.4. Sustav za odzračivanje kalupa

Prilikom procesa uljevanja taline u kalupnoj šupljini dolazi do nakupljanja neželjenih plinova i zraka. Nakupljanjem tih plinova može doći do neželjenih oštećenja otpreska i nepotpunog i nekvalitetnog popunjavanja kalupa. Prilikom konstruiranja sustava za odzračivanje potrebno je uzeti u obzir dovoljan broj elemenata za odzračivanje. Svi elementi za odzračivanje moraju biti na kraju putanje taline kako bi se osiguralo nesmetano ozračivanje tijekom cijelog procesa ubrizgavanja. Mjesto za odzračivanje se izabire na temelju osobne procjene ili primjenom neke od jednostavnih metoda popunjavanja kalupa prije ubrizgavanja (simulacija prešanja). Najčešće mjesto za odzračivanje u kalupu je mjesto za izbacivanje otpreska iz kalupa [14].

2.5. Sustav vađenja otpreska iz kalupa

Osnovna funkcija sustava za vađenje otpreska iz kalupa je otvaranje kalupne šupljine i vađenje otpreska iz kalupa pri čemu sustav mora zadovoljiti određene zahtjeve.

Zahtjevi sustava za vađenje kalupa:

- vađenje otpreska bez oštećivanja,
- ostavljanje što manje vidljivih otisaka na otpresku,
- jednoliko vađenje otpreska,

- pravilno postavljeni elementi za vađenje otpreska,
- pravilna koordinacija elemenata sustava za vađenje otpreska sa ostalim sustavima kalupa.

Sustav za izbacivanje otpreska ima vrlo bitnu ulogu u cjelokupnom procesu prešanja jer se bavi konačnim oblikom otpreska te su bilo kakve pogreške u ovoj fazi procesa nedopustive. Jedan od najčešćih pogrešaka prilikom konstruiranja izbacivača otpresaka je njihova premala dimenzija što u konačnici dovodi do pucanja ili loma končanog otpreska. Na temelju načina funkcioniranja i integracije sustave za vađenje otpreska možemo podijeliti na one koji su sastavni dio kalupa i na one koji djeluju van kalupa u obliku dodatne opreme.

Sustavi za izbacivanje otpreska se prema načinu pogona mogu podijeliti na:

- mehanički sustavi,
- hidraulički sustavi,
- pneumatski sustavi,
- mješoviti sustavi.

U procesu injekcijskog prešanja najpoznatiji sustav vađenja otpreska je mehanički sustav. Najzastupljeniji je sustav za vađenje otpreska koristeći izbacivala. Upotreba sustava sa izbacivalom se koristi kod otpresaka veće debljine gdje je manja mogućnost pucanja i gdje ne ostaju tragovi izbacivanja na otpresku. Postoje različite vrste i geometrijske izvedbe izbacivala ovisno o kalupu i geometrijskom obliku otpreska. Također postoje određeni zahtjevi koji moraju biti zadovoljeni kako bi izbacivanje otpreska bilo zadovoljavajuće. Zbog toga je potrebno izbacivalo postaviti na najnižu točku u kalupu. Izbacivalo je potrebno smjestiti simetrično po presjeku otpreska, izbacivalo smjestiti na rebra ili izbočine otpreska, izbacivalo smjestiti na uglove otpreska [15].

2.6. Tijek procesa injekcijskog prešanja

Osnovna zadaća tijeka injekcijskog prešanja je dobivanje željenog otpreska u jednom ciklusu. Proces injekcijskog prešanja se dijeli na 4 glavne faze injekcijskog prešanja:

- priprema i taljenje plastomerne taljevine,
- punjenje kalupne šupljine,
- djelovanje dodatnog tlaka, tlačenje,
- vađenje otpreska iz kalupne šupljine.

Tijek procesa injekcijskog prešanja se sastoji od dovođenja plastomera u obliku granula u uvlačnu zonu pužnog prijenosa. Plastomeri se pohranjuju u spremnik koji konstanto dozira količinu granulata prema pužnom prijenosu kako u procesu prešanja ne bi došlo do nedostatka taljevine.

Unutar stijenke cilindra pužnog vijka dolazi do dovođenja potrebne temperature za taljenje granula plastomera. Temperatura se dovodi različitim grijalima ali isto tako i pretvaranjem mehaničke energije trenja pužnog cilindra u toplinsku energiju. U ovoj fazi procesa prešanja dolazi do pomaka taljevine unutar dostavnog cilindra i održavanja potrebne temperature za izvedbu ostatka procesa.

Primjenom pogonske jedinice dolazi do vrtnje pužnog vijka i prijenosa taline prema kalupnoj šupljini te se u toj fazi procesa ostvaruje naknadni pritisak koji je međusobno uzrokovan potiskivanjem taline. Zbog nastanka pristiska, sile reakcije dijeluju na pužni vijak te je potrebno odrediti točne parametre vrtnje vijka i održavanja željene temperature taline.

Posljednji korak u procesu je samo ubrizgavanje taline u kalupnu šupljinu. Pužni vijak u ovom slučaju djeluje kao klipni cilindar tjerajući talinu pod određenim pritiskom u kalupnu šupljinu. Prilikom pomicanja pužnog vijka u ovoj fazi procesa onemogućeno mu je okretanje. Po završetku ubrizgavanja pritisak se smanjuje no i dalje ostaje na određenoj vrijednosti kako ne bi došlo do povrata taline iz kalupa u suprotnom smjeru od smjera prešanja. Nakon isteka određenog vremena pritisak se smanjuje i pužni vijak se počinje okretati pripremajući talinu za ponovni proces. Kao posljednji korak preostaje hlađenje otpreska i vađenje otpreska iz kalupne šupljine [15].

2.7. Materijali za izradu kalupa za injekcijsko prešanje polimera

Kalupi za injekcijsko prešanje polimera izrađuju se od najkvalitetnijih materijala. S obzirom na svoje uvjete eksploatacije zahtjevi koji se stavljaju pred njih su veliki. Velike serije, što manja potrošnja kalupa, što veća efikasnost su samo neki od uvjeta koji moraju biti ispunjeni prilikom odabira materijala za izradu kalupa. Odabir materijala za izradu kalupa se temelji na određenim kriterijima kao što su postupak toplinske obrade kalupne šupljine, vrsta plastomera koji se koristi za ubrizgavanje, broj otpresaka, dimenzija i oblik otpreska. Glavni cilj postavljanja kriterija je smanjenje trošenja kalupa. Kvalitetnim odabirom materijala trošenje kalupa može biti svedeno na minimum. Na slici 2 prikazan je primjer kalupa za injekcijsko prešanje.

Prema serijama proizvodnje kalupi se dijele na male i velike serije. Shodno tome i podjela materijala od kojih se izrađuju kalupi također se dijeli u dvije grupe.

Materijali za izradu kalupa koji se primjenjuju u malim serijama su:

- nikal,
- bakar,
- polimerni materijali,
- berilijeva bronca,
- slitine na osnovi cinka i aluminija.

Materijali za izradu kalupa koji se primjenjuju u velikim serijama su:

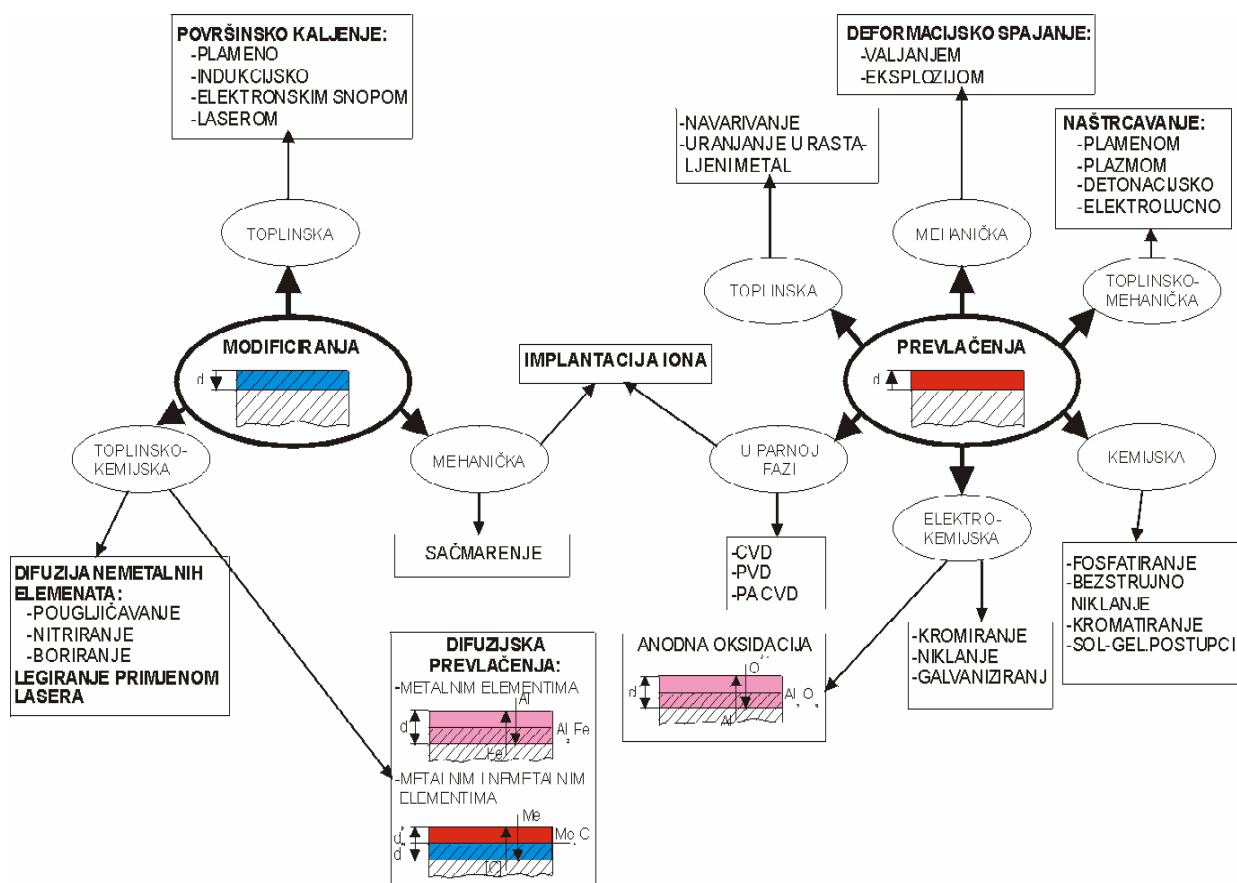
- čelični ljevovi,
- poboljšani čelici,
- prokaljivi čelici,
- čelici povišene tvrdoće [15].



Slika 2: Primjer bakrenog kalupa za injekcijsko prešanje plastomera [18]

3. POSTUPCI POVRŠINSKE OBRADE MATERIJALA

U svrhu postizanja željenih svojstava površine materijala osnovna podjela postupaka površinske obrade materijala je postavljena na temelju osnovnih fizikalnih i kemijskih zahtjeva koji moraju biti zadovoljeni. Stoga se osnovna podjela vrši na postupke modificiranja i postupke prevlačenja površina. Postoje razlike između modificiranja i prevlačenja površina. Kod modificiranja površina novo nastali površinski sloj se od polazne površine širi prema unutrašnjosti materijala. U postupku prevlačenja površinski sloj nastaje na polaznom sloju površine bez napredovanja u unutrašnjost materijala. Cilj površinske obrade je nastajanje novih površinskih slojeva čija se svojstva razlikuju od svojstava početnog materijala u vidu kemijskog sastava, mikrostrukture, kristalne rešetke i drugih fizikalnih i kemijskih čimbenika [5]. Na slici 3 je prikazana podjela postupaka modificiranja i prevlačenja površina.



Slika 3: Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja površina [5]

Postupci modificiranja se dijele prema sljedećoj podjeli:

- mehanički,
- toplinski,
- toplinsko-kemijski.

Postupci prevlačenja se dijele prema sljedećoj podjeli:

- toplinski,
- mehanički,
- toplinsko-mehanički,
- kemijski,
- elektrokemijski,
- prevlačenje u parnoj fazi.

Uz navedene postupke i osnovnu podjelu postoje još tri skupine postupaka koji se mogu svrstati u postupke modificiranja i prevlačenja a to su:

- implantacija iona,
- anodna oksidacija,
- difuzijsko prevlačenje [5].

3.1. Mehaničko modificiranje površine

Osnovni cilj mehaničkog modificiranja površine je povećanje otpornosti na trošenje. Provodi se unošenjem tlačnih napetosti u površinski sloj obrađivanog materijala što u konačnici izaziva promjene u kristalnoj rešetki obrađivanog materijala. Dolazi do pomicanja i umnožavanja dislokacija koje povećavaju otpornost na trošenje. Najzastupljeniji postupci mehaničkog modificiranja su sačmarenje i valjanje. Sačmarenje se provodi na konstrukcijskim dijelovima kao što su zupčanici u cilju postizanja povišene dinamičke izdržljivosti zupčanika [5].

3.2. Toplinsko modificiranje površine

Provodi se na način da se u površinski sloj strojnog dijela unosi određana toplotna energija. Unošenjem toplotne energije dolazi do površinskog kaljenja površine strojnog dijela. Iznos unesene toplotne energije se odnosi prvenstveno na površinski sloj. Najzastupljeniji procesi površinskog kaljenja su:

- plameno kaljenje,
- indukcijsko kaljenje,
- kaljenje elektronskim snopom,
- kaljenje laserskim snopom [5].

U slučaju plamenog kaljenja grijanje površine na temperaturu austenitizacije se ostvaruje izgaranjem gorivog plina i kisika u plameniku. Gašenje i hlađenje se provodi pomoću prskalice. Cjelokupni sklop za plameno kaljenje ovisi o radnim dimenzijama i geometrijskom obliku radnog komada.

Kod indukcijskog kaljenja grijanje površine radnog komada na temperaturu austenitizacije se ostvaruje elektromagnetskim poljem induktora koje inducira vrtložne struje u obradku. Odlika indukcijskog kaljenja je puno brže zagrijavanje površine radnog komada na temperaturu austenitizacije, te je i samim time temperatura austenitizacije viša nego kod plamenog kaljenja (temp. austenitizacije se određuje iz TTS dijagrama). Gašenje se provodi prskanjem rashladnim sredstvom pomoću prskalice ili uranjanjem radnog komada u sredstvo za gašenje.

U novije doba sve veću primjenu nalaze postupci kaljenja elektronskim i laserskim snopom. Odlika ovih procesa je postizanje manjih dubina zagrijavanja i zakaljivanja što sam proces čini preciznijim [5].

3.3. Toplinsko-kemijsko modificiranje površine

Unošenjem toplinske energije ali i drugih kemijskih elemenata u površinski sloj mijenja se mikrostruktura, svojstva i kemijski sastav obrađivane površine. Proces se sastoji od unošenja nemetalnih elemenata u površinski sloj obrađivanog materijala mehanizmom difuzije. Upotreba ove metode modificiranja je vrlo raširena u strojarskoj industriji kroz procese pougljičavanja, nitriranja, karbonitriranja, nitrokarburiranja i boriranja. U industriji se najviše upotrebljavaju procesi pougljičavanja i nitriranja koji imaju široku primjenu. Proces karbonitriranja i boriranja se ne koriste u toliko širokoj primjeni [5].

3.4. Toplinsko prevlačenje

Postupak prevlačenja koji nastaje primjenom topline za rastaljivanje metalnog materijala koji potom u procesu kristalizira na površini obrađivanog predmeta. Na taj način se nanose metalni slojevi materijala postupcima navarivanja ili postupcima uranjanja cijelog radnog komada u talinu rastaljenog metala. Cilj provođenja navarivanja je stvaranje novog postojanog sloja na površini radnog komada čija je funkcija smanjenje trošenja osnovnog radnog komada. Ukoliko dođe do trošenja navarenog komada, on se lako može ponovno navariti i na taj način produžiti vijek trajanja radnog komada. U slučaju uranjanja u talinu rastaljenog metala, radni komad se uranja u talinu metala čija je temperatura tališta niža od temperature tališta čelika. Najčešće su to cink i olovo (Zn i Pb) koji se primjenjuju kao zaštita od korozije i kemijskog djelovanja [5].

3.5. Mehaničko prevlačenje

Postupak prevlačenja površina radnog komada primjenom mehaničkog djelovanja u svrhu spajanja dvaju različitih materijala bitno različitih svojstava. Cilj spajanja je postizanje željenih svojstava obrađivanog komada. U najčešćem slučaju to je otpornost na koroziju i kemijska postojanost. Postupci mehaničkog prevlačenja su toplo valjanje ali u novije vrijeme najpoznatiji proces je eksplozijsko spajanje dvaju radnih komada [5].

3.6. Toplinsko-mehaničko prevlačenje

Toplinsko-mehaničko prevlačenje je postupak prevlačenja koji kombinira dva postupka istovremeno. Provodi se na način da se usmjerenom toplinskom energijom rastali dodatni materijal na površini radnog komada a zatim se te iste rastaljene čestice mehaničkom silom usmjeravaju na površinu radnog komad gdje i kristaliziraju. Postupci toplinsko-mehaničkog prevlačenja su plazmeno naštrcavanja, plameno naštrcavanje, elektrolučno naštrcavanje. Cilj provedbe postupka je poboljšanje korozijske postojanosti obrađivanog predmeta kao i povećanje otpornosti prema kemijskom djelovanju te kemijska postojanost radnog komada u različitim radnim uvjetima. Dodatni materijali prilikom naštrcavanja su razni metali, legure i mješavine keramičkih materijala. Nakon provedenog postupka debljina sloja na radnom komadu je jednolika, ali se isto tako debljina može vrlo lako kontrolirati tijekom izvođenja procesa. Ukoliko dođe do trošenja nanešenog dijela isti se vrlo lako može ponovno obnoviti provedbom procesa [5].

3.7. Kemijsko prevlačenje

Postupak kemijskog prevlačenja se provodi uglavnom sa ciljem povećanja korozijske postojanosti, kemijske postojanosti ali i povećanja otpornosti na trošenje radnog komada. Najzastupljeniji postupci kemijskog prevlačenja su postupci fosfatiranja, bezstrujnog nikljanja, kromatiranja i u novije vrijeme sol-gel postupci. Primjenom navedenih postupaka dobivaju se vrlo velike kvalitete površine obrađivanog komada s izmjerenim tvrdoćama od 500 HV [5].

3.8. Elektrokemijsko prevlačenje

Postupak elektrokemijskog prevlačenja je kombinacija dvaju postupaka u cilju postizanja željenih svojstava obrađivanog komada. Provođenjem postupka povećava se korozijska otpornost radnog komada kao i kemijska postojanost. Postupak kromiranja je jedan od postupaka elektrokemijskog prevlačenja gdje kromirani površinski sloj radnog komada postiže visoku otpornost prema koroziji, povišenu tvrdoću kao i povišenu otpornost na trošenje. Kao što je to slučaj i kod prethodnih postupaka prevlačenja, istrošeni slojevi su lako mogu ponovno nanositi i obnavljati [5]

4. POSTUPAK PREVLAČENJA U PARNOJ FAZI

U novije vrijeme postupci prevlačenja u parnoj fazi zauzimaju jako velik udio postupaka prevlačenja i produljenja trajnosti strojnih dijelova u industriji. Područja koja su obuhvaćena ovim postupkom odnose se na razne konstrukcijske elemente, alate, kalupe, elemente strojeve. Glavni cilj provede postupka prevlačenja je poboljšanje početnih svojstava radnog komada. U to spadaju otpornost na koroziju, kemijska postojanost, povećana otpornost na trošenje (bolja tribološka svojstva). Spojevi i elementi koji se nanose u postupku prevlačenja spadaju u skupine metalorganskih spojeva, oksidne i neoksidne keramike (TiC, TiN, TiAlN, TiAlCN). Postupci prevlačenja u parnoj fazi dijele se na četiri osnovna postupka:

- postupci kemijskog prevlačenja u parnoj fazi-CVD,
- postupci fizikalnog prevlačenja u parnoj fazi-PVD,
- plazmom potpomognuti postupci kemijskog prevlačenja u parnoj fazi-PACVD,
- plazmom potpomognuti postupci fizikalnog prevlačenja u parnoj fazi-PAPVD [5].

4.1. Prevlačenje u parnoj fazi-CVD

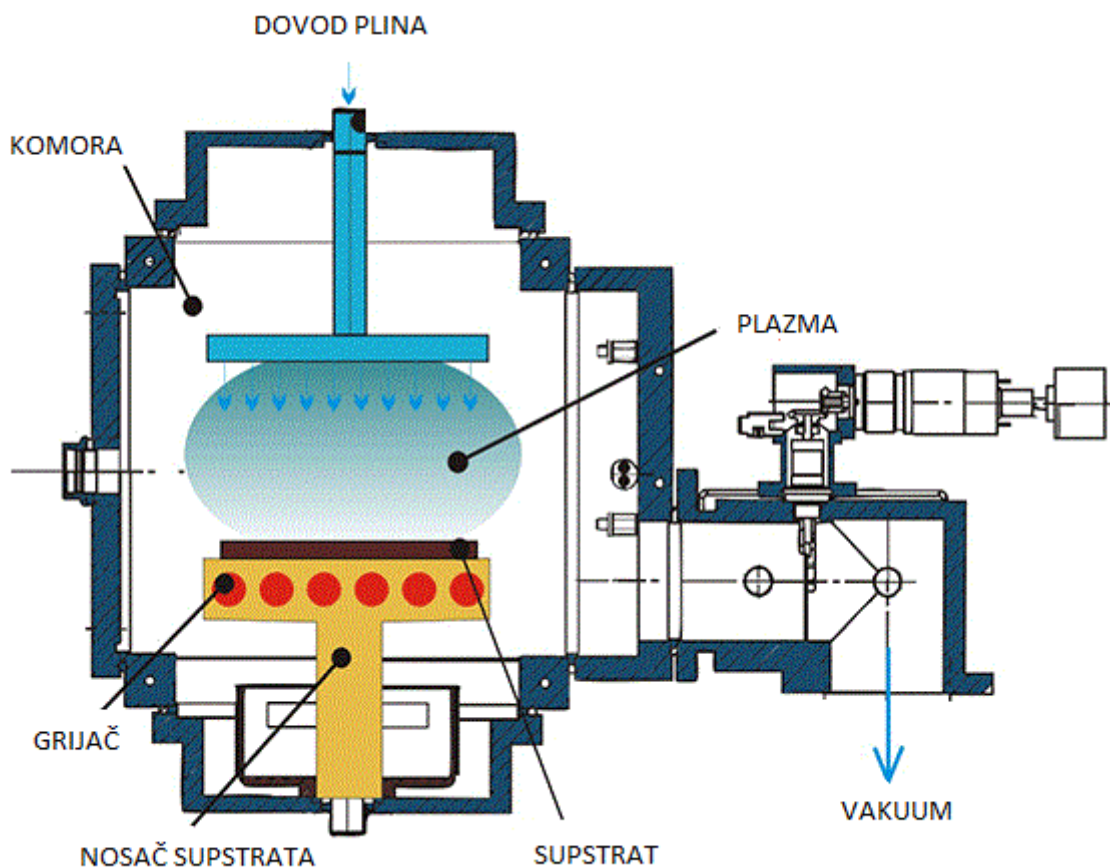
CVD-engl., Chemical Vapor Deposition

Postupak kemijskog prevlačenja u parnoj fazi gdje se zaštitni sloj na radni komad nanosi kemijskim putem u svrhu dobivanja tankog sloja na površini radnog komada. Proces se odvija kao interakcija smjese plinova i zagrijane površine radnog komada. Prilikom zagrijavanja radnog komada dolazi do kemijske reakcije korištenih plinskih komponenti pri visokim temperaturama i taloženja tih plinova na površinu radnog komada. Taloženjem se stvara tanki zaštitni sloj koji djeluje kao prevlaka na površini obrađivanog materijala. Temperatura provođenja postupka iznosi oko 1000°C u trajanju od 1-6 sati. Na slici 3. prikazan postupak CVD prevlačenja.

Postupak prevlačenja u parnoj fazi daje kvalitetne zaštitne slojeve na površini obrađivanog materijala čija se debljina može kontrolirati provedbom postupka. Spojevi dobiveni postupkom: TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCN, Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 .

Sam postupak prevlačenja se odvija u nekoliko glavnih koraka. Prvi korak je isparavanje i transport plinovitih reaktanata prema površini obrađivanog komada. U ovoj fazi dolazi i do stvaranja nusprodukata i strujanje je turbulentno. Drugi korak se sastoji od difuzijskog prodiranja reaktanata kroz granični sloj obrađivanog komada gdje se u toj fazi procesa odvija laminarno

strujanje. Treći korak postupka prevlačenja se sastoji od adsorpcije reaktanata na površinu radno komada koja je zagrijana na odgovarajuću temperaturu te dolazi do reakcija i stvaranja čvrstog sloja na površini radnog komada. Zadnji korak je desorpcija plinskih produkata i nusprodukata iz graničnog sloja te odstrujavanje iz sloja obrađivanog predmeta [4].



Slika 4: Prikaz provođenja CVD postupka [19]

CVD postupak prevlačenja u parnoj fazi može se podijeliti u nekoliko skupina. Pa tako postoji podjela prema operativnom tlaku i prema temperaturnom rasponu.

Podjela CVD postupaka prema tlaku:

- CVD postupka pri atmosferskom tlaku (APCVD),
- CVD postupak pri smanjenom tlaku-smanjenjem pritiska smanjuje se opasnost od postizanja neželjenih spojeva i postiže se ujednačenost prevlake (LPCVD),
- CVD postupak pri visokom vakuumu-provedba postupka pri vrlo niskom tlaku koji iznosi ispod 10^{-6} Pa (UHVCVD).

Prema temperaturnoj podjeli CVD postupci se dijele na:

- visokotemperaturne,
- srednjetemperaturne,
- niskotemperaturne.

Visokotemperaturne CVD prevlake su najčešće na bazi titana Ti(C/N) i aluminijske oksida. Temperatura se kreće u području oko 1000°C. U slučaju srednjetemperaturnih prevlaka temperatura se kreće u rasponu od 700-900°C. Niskotemperaturne prevlake se provode na temperaturama ispod 700°C. U sva tri slučaja svojstva prevlaka se odlikuju antikorozivnim svojstvima i poboljšanjem otpornosti na trošenje [3].

Prednosti CVD postupka prevlačenja:

- dobra kontrola debljine zaštitnog sloja,
- dobivaju se homogeni i ujednačeni slojevi čije se vrijednosti čistoće kreću blizu teorijskoj,
- moguća kontrola rasta veličine zrna i kristalne strukture,
- mogućnost stvaranja metastabilnih faza,
- oprema potrebna za provođenje procesa je jednostavna,
- za provođenje procesa nije potreban visoki vakuum što smanjuje cijenu izvedbe postupak ali i opreme,
- brzina deponiranja zaštitnog sloja se može jednostavno regulirati i motriti.

Nedostatci CVD postupka prevlačenja:

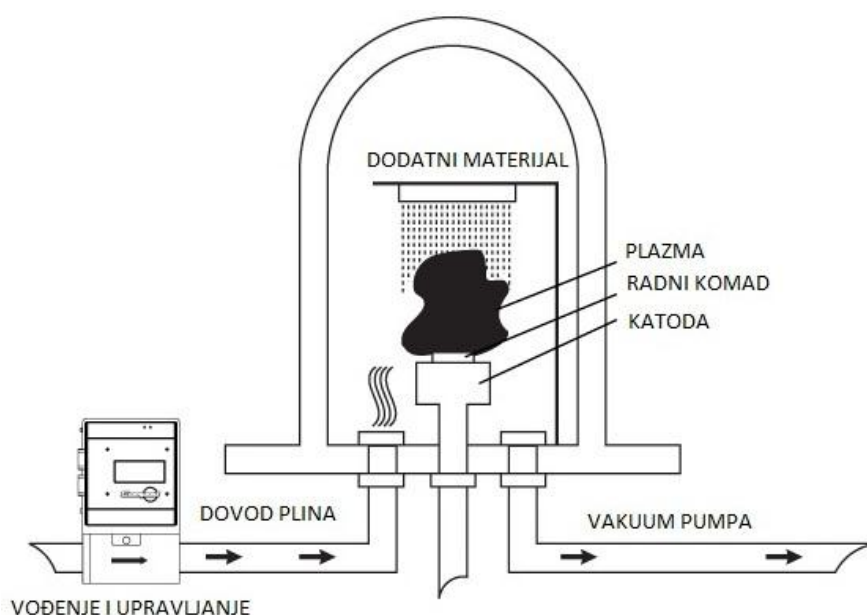
- kod visokotemperaturnog i srednjetemperaturnog prevlačenja temperatura provođenja postupka je vrlo visoka,
- zbog visokih temperatura postoji opasnost od deformacija,
- zbog upotrebe različitih kemijskih spojeva potrebna je zatvorena i kontrolirana atmosfera,
- pri visokim temperaturama procesa potrebna je velika količina energije za deponiranje zaštitnog sloja,
- za visoko vakuumsko provođenje prevlačenja cijena opreme je vrlo velika [4].

4.2. Prevlačenje u parnoj fazi-PVD

PVD- engl., Physical Vapor Deposition

Fizikalni postupak nanošenja prevlake iz parne faze. Dodatni deponirani materijal je dobiven na fizikalni način. Prevođenje do radnog komada se vrši na način da se iz čvrste faze taj materijal prevodi u parnu fazu na osnovni materijal gdje se ta konačna parna faza formira (kondenzira) u obliku tankog zaštitnog sloja na površini radnog komad. Prevlake koje se mogu dobiti ovim postupkom mogu biti višeslojne i mogu nastati od gotovo svih elemenata. Temperatura provođenja ovog procesa je znatno niže nego li je temperatura u postupku CVD prevlačenja što omogućuje prevlačenje raznih alata koji nisu u mogućnosti podvrgnuti se postupku CVD prevlačenja. Temperaturni raspon za provedbu PVD postupka prevlačenja je od 150-500°C. Upravo koristeći se ovim temperaturnim rasponom izbjegavaju se bilo kakve fazne transformacije u osnovnom materijalu što postupak čini vrlo pristupačnim.

Deponiranje zaštitnog filma na površinu radnog komada može biti u više slojeva. Ukoliko je prevlaka jednoslojna debljina prevlake iznosi u najčešćim slučajevima oko 2-5 μm . Također moguća je izvedba i višeslojnih prevlaka te u tom slučaju debljina prevlake može varirati ovisno u slučaju ali iznosi oko 16 μm . Brzina deponiranja zaštitnog sloja na površinu radnog komada iznosi 3-18 $\mu\text{m}/\text{h}$ [2]. Na slici 4. prikazan je postupak PVD prevlačenja.



Slika 5: Prikaz PVD postupka prevlačenja [10]

Cijeli postupak provedbe procesa PVD prevlačenja odvija se u tri glavna koraka. U prvom koraku dolazi do isparavanja čestica od strane izvora. Vrijeme i temperatura ovise o materijalu i odnos su optimalne temperature materijala i maksimalne moguće temperature na kojoj se još uvijek ne mijenjaju osnovna svojstva materijala. U drugom koraku dolazi do transporta deponiranog materijala do radnog komada. Transport od izvora do radnog komada može biti kroz plazmu ili vakuum. Konačni korak je samo deponiranje dodatnog materijala na sam radni komad te stvaranje tankog sloja [2].

Alati koji se najčešće podvrgavaju postupku PVD prevlačenja su alati za tlačno ljevanje metala, alati za obradu metala rezanjem, alati za oblikovanje deformacijom (trnovi, matrice), glodala, svrdla, kokile.

Prednosti PVD postupka prevlačenja:

- moguća je upotreba vrlo širokog spektra materijala za deponiranje u svrhu postizanja vrlo raznolikih zaštitnih slojeva,
- ekološki prihvatljiv proces,
- moguće je koristiti nekoliko tehnika za deponiranje željenog zaštitnog sloja,
- PVD prevlake se odlikuju odličnom korozijskom, temperaturnom i tribološkom postojanošću [9].

Nedostatci PVD postupka prevlačenja:

- neke izvedbe postupaka se izvodi pod određenim temperaturama i visokim vakuumom što zahtjeva posebno motrenje,
- potreban je rashladni sustav kako bi se toplina kvalitetno odvodila [2].

4.3. Plazmom potpomognuto prevlačenje-PACVD

PACVD-engl., Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition

Osnovna karakteristika plazmom potpomognutog CVD prevlačenja je to što koristi osnovne elemente provedbe CVD i PVD prevlačenja što postupku u konačnici omogućuje nižu temperaturu provedbe samog postupka. PACVD za zagrijavanje radnog komada i aktiviranje kemijske reakcije koristi plazmu. Postupak se odvija na način da se koristi energija slobodnih elektrona kao reakcija za taloženje i deponiranje. Plazma je bilo koji plin čiji je značajni broj atoma i molekula u ioniziranom stanju. Dovođenjem električne energije pri dovoljno visokom naponu i odgovarajućem tlaku dolazi do dijeljenja plina i nastanka plazme. Plinski reaktanti se ioniziraju i razgrađuju prilikom sudaranja s elektronima i u tom trenutku nastaju kemijski aktivni ioni koji se nakon kemijske reakcije talože na površinu radnog komada tvoreći tanki zaštitni sloj [1]. Na slici 5. je prikazano PACVD postrojenje,



Slika 6: PACVD postrojenje [20]

Koristeći plazmu brzina deponiranja je veća nego što je to slučaj kod CVD i PVD prevlačenja dok temperatura provođenja procesa osigurava jednoliko stvaranje zaštitnog sloja bez opasnosti od toplinskih deformacija na radni komad. Snižanjem temperature provedbe postupka proširena je primjena provedbe prevlačenja na razne alate kao što su alatni čelici za hladni rad. Temperatura provedbe procesa je snižena do 200 °C . Debljina slojeva prevlake se kreće u rasponu od 1-10 μ m uz brzinu deponiranja od 1 μ /h [13].

Kako bi se postigla željena svojstva radnog komada postoji mogućnost nanošenja različitih slojeva kao što su TiN, TiC, TiBN, TiAlN, TiCN, Al₂O₃, DLC .

Prednosti PACVD postupka prevlačenja:

- postizanje jednolikog i ujednačenog deponiranog sloja,
- vizualni izgled završne obrade,
- dobra otpornost na trošenje [13].

Nedostatci PACVD postupka:

- skupa provedba postupka,
- vrlo skupa oprema i montaža opreme [13].

5. SLOJEVI DOBIVENI PRIMJENOM PACVD POSTUPKA I NJIHOVA PRIMJENA

5.1. Titan nitrid (TiN)

Zbog svojih vrlo dobrih uravnoteženih svojstava TiN je prevlaka koja se vrlo često koristi. Koristi se najviše za prevlačenje alata za obradu metala rezanjem. Prevlaka se odlikuje vrlo dobrim mehaničkim svojstvima, visokom tvrdoćom kao i vrlo visokom otpornosti na trošenje. Svoju primjenu nalazi u prevlačenju reznih alata jer smanjuje koeficijent trenja na površini, omogućava strugotini lakši protok, onemogućava naljepljivanje naslaga na rub rezne oštrice i smanjuje zagrijavanje reznog alata. Odlikuje se vrlo dobrom kemijskom postojanošću što ga čini pogodnim za upotrebu u medicini i prehrambenoj industriji. Svojom zlatnom bojom spada u dekorativne slojeve [6]. Na slici 6. je prikazana primjena TiN prevlake na reznim alatima.

Osnovne karakteristike prevlake TiN:

- mikrotvrdoća - 2300 HV,
- radna temperatura $\vartheta = 200 - 600^{\circ}\text{C}$,
- debljina sloja $1-6\mu\text{m}$,
- boja - zlatna [6].

Primjena prevlake:

- alati za bušenje (svrdla),
- rezni alati,
- alati niske tvrdoće [6].



Slika 7: TiN prevlaka na reznim alatima [21]

5.2. Titan bor nitrid (TiBN)

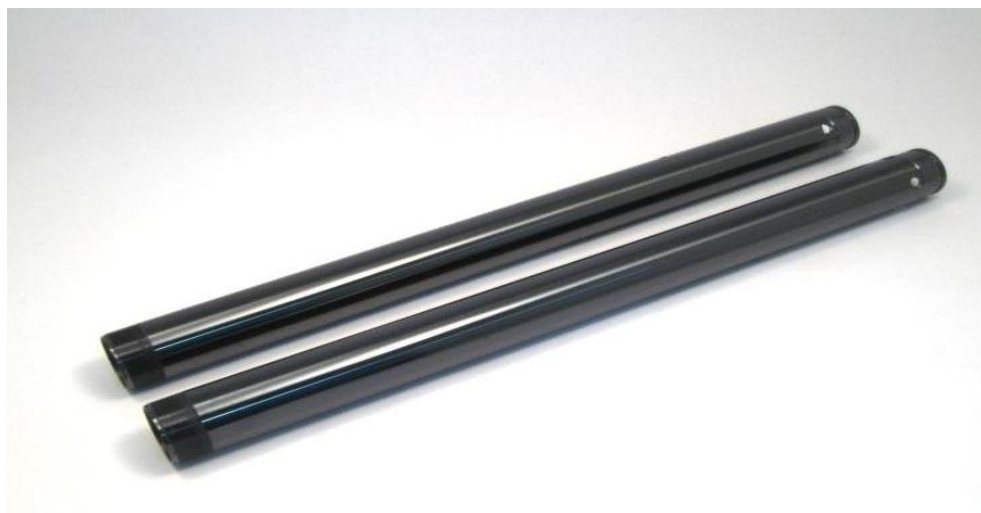
TiBN prevlaka se odlikuje dobrom otpornošću na koroziju što prevučenom alatu daje produženi životni vijek. Mehanička svojstva prevlake su također vrlo zadovoljavajuća. Kombinacija sa Borom čiji udio u cjelokupnom elementu daje poboljšana mehanička i tribološka svojstva. Ova prevlaka također svoju prvenstvenu primjenu ima kod reznih alata. Na slici 7. je prikazan primjer TiBN prevlake [8].

Osnovne karakteristike prevlake TiBN:

- mikrotvrdoća - 3500 HV,
- radna temperatura $\vartheta = 600 - 900^{\circ}\text{C}$,
- debljina sloja $2-4\mu\text{m}$,
- boja - siva.

Primjena prevlake:

- alati za oblikovanje rezanje i savijanje,
- alati opterećeni u radu na visoka mehanička opterećenja,



Slika 8: Primjer primjene TiBN prevlake [8]

5.3. Titan karbo nitrid (TiCN)

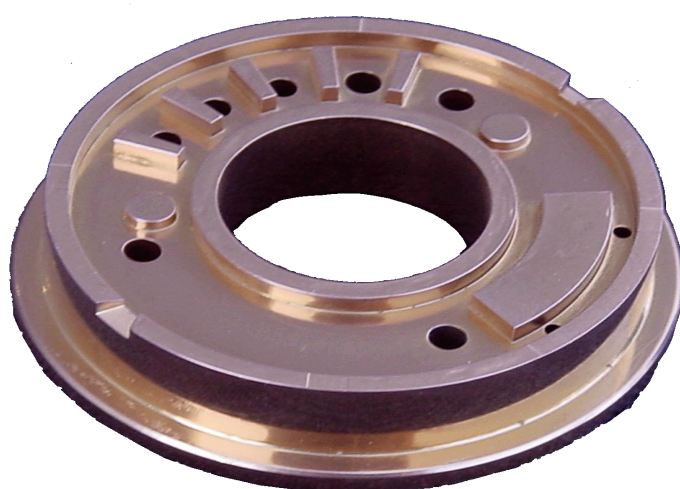
TiCN je tvrda prevlaka koja se odlikuje različitim svojstvima. Zbog svoje visoke čvrstoće, visokog elastičnog modula, dobre adhezije na površinu radnog komada i malog koeficijenta trenja primjenjuje se kao prevlaka na većini reznih alata. Prevlaka se također odlikuje visokom otpornošću na trošenje i visokom temperaturom tališta. Dobro podnosi glodanje i ostale obrade odvajanjem čestica. Prevlaka je razvijena zbog prevelikog trošenja TiN prevlake koja ima lošija svojstva od TiCN prevlake [7]. Prikaz TiCN prevlake na slici 8.

Osnovne karakteristike prevlake TiCN:

- mikrotvrdoća-3000 HV,
- radna temperatura $\vartheta = 400^{\circ}\text{C}$,
- debljina sloja 2-3 μm ,
- boja-smeđa [7].

Primjena prevlake:

- alati za rezanje i savijanje,
- alati opterećeni u radu na visoka mehanička opterećenja [7].



Slika 9: Prikaz strojnog dijela prevučenog TiCN prevlakom [22]

5.4. DLC (engl., Diamond like carbide)

DLC je također tvrda prevlaka koja se odlikuje jako dobrim svojstvima. Najvažnija svojstva koja obilježavaju DLC prevlake su visoka otpornost na trošenje, kemijska inertnost, visok električni otpor, mali koeficijent trenja. Prevlaka je crne boje kao što je prikazano na slici 9. i ima čestu upotrebu u dekorativne svrhe. Glavni cilj primjene DLC prevlaka je osiguranje željenih svojstava prevučenog dijela svojstvima koja odgovaraju dijamantu na skoro bilo kojoj vrsti obrađivanog materijala. Taloženje i deponiranje DLC prevlaka se provodi u kontroliranoj atmosferi koja sadrži potreban postotak vodika. Određivanjem potrebnog postotka ugljika određuje se kvaliteta i struktura prevlake kao i prijanjanje na podlogu obrađivanog radnog komada [24].

Osnovne karakteristike DLC prevlaka:

- mikrotvrdoća - 7000 HV,
- debljina sloja - $1-3\mu m$,
- radna temperatura $\vartheta = 300^{\circ}C$,
- boja - crna.

Primjena prevlake:

- za alate za obradu grafita,
- obrada neželjeznih metala,
- prevlaka za nemetalne materijale,
- prevlačenje prijenosnih zupčanika.



Slika 10: Dijelovi motora prevučeni DLC prevlakom [23]

6. EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA KALUPA

U novije vrijeme sve više koristeći se prevlakama dobivenim PACVD postupcima prevlače se alati različitih primjena. U tu grupu alata spadaju alati za prešanje, alati za hladno oblikovanje, rezni alati, alatni čelici za topli i alatni čelici za hladni rad.

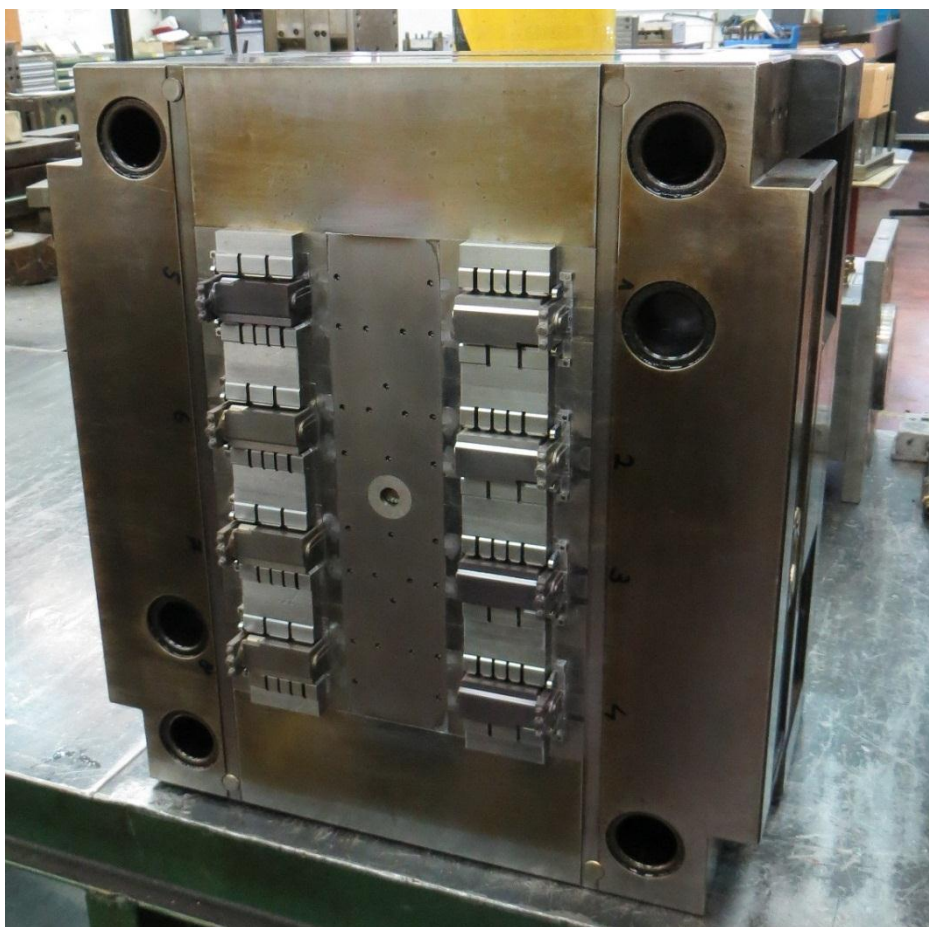
Svojstva i prednosti dobivene postupcima prevlačenja su višestruka. Prevučenom alatu se poboljšava otpornost na trošenje, korozijska i kemijska postojanost, postojanost u radu pri povišenim temperaturama. Sva navedena svojstva osiguravaju dulji vijek trajanja alata što u konačnici donosi veću financijsku isplativost i dulje cikluse rada.

Slojevi nanесeni postupcima prevlačenja odlikuju se vrlo dobrom prionjivošću. Moguć je postupak višestrukog nanošenja slojeva u svrhu dobivanja deblje prevlake. Dobre karakteristike slojeva prevlaka osiguravaju dobru postojanost, dobra mehanička svojstva kao i niske koeficijente trenja.

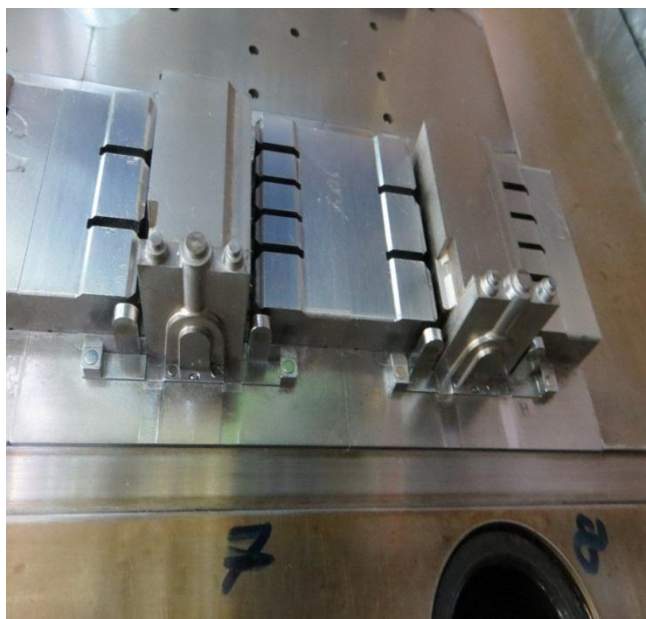
U eksperimentalnom dijelu rada biti će obrađeni kalupi za injekcijsko prešanje čiji su dijelovi prevučeni PACVD postupkom prevlačenja. Cilj prevlačenja je produljenje trajnosti kalupa za injekcijsko prešanje polimera. Prevlake koje će biti nanесene na ispitne uzorke su TiCN i TiBN. Uzorak D2 prevučen je prevlakom TiCN. Uzorak D3 prevučen je prevlakom TiBN. Oba uzorka su izrađena od alalnog čelika oznake X210CrW12 , tvorničke oznake K110. Provedena ispitivanja sastoje se od mjerenja debljine slojeva kalotestom i kvantitativne kemijske analize provedene metodom GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectrometry).

6.1. Prikaz i parametri postupka prešanja

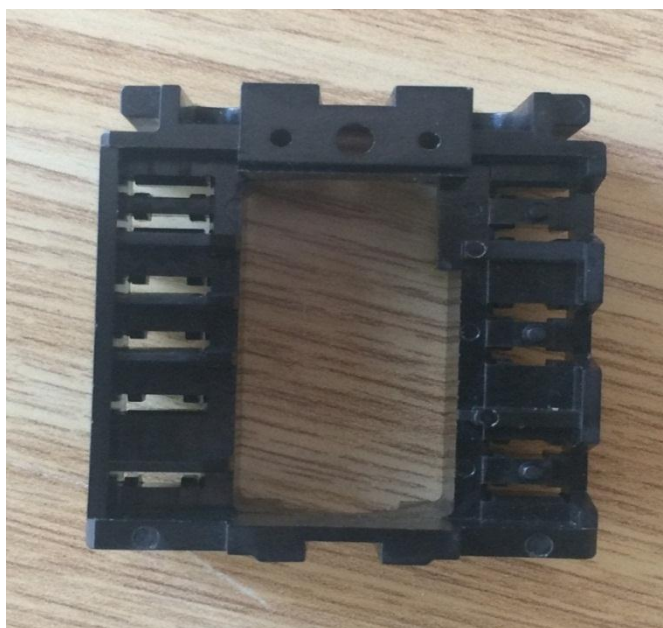
Kalupi podvrgnuti postupku prevlačenja koriste se u procesu injekcijskog prešanja polimernih materijala u serijskoj proizvodnji. Konačni proizvod je plastični izradak koji služi kao kućište elektroničkih komponenti za kasniju ugradnju kod krajnjega kupca. Cilj provođenja postupka prevlačenja je eliminacija neželjenog trošenja umetka kalupa. Na slici 10 i 11 prikazan kalup za injekcijsko prešanje polimernih komada kao i konačni izradak na slici 12.



Slika 11: Kalup za injekcijsko prešanje polimernih komada



Slika 12: Umetak kalupa



Slika 13: Konačni izradak

Podaci o izradku:

- izradak: Kućište električnih komponenti
- broj dijela: 46.851.01,
- materijal: PF 2175 9005 S1.

Podaci o ispitivanom kalupu i proizvodnji:

- kalup sastavljen od 8 matrica,
- dio kalupa-umetak žiga,
- godišnja proizvodnja-8.000.000,00 komada,
- stroj: Bucher 160 t.



Slika 14: Stroj za prešanje BUCHER 160t

6.2. PACVD postupak prevlačenja uzoraka

Prevlačenje PACVD postupkom provedeno je na alatnom čeliku za hladni rad oznake X210CrW12. Navedeni čelik se može još pronaći pod industrijskom oznakom K110. Kemijski sastav čelika je naveden u tablici 1.

Tablica 1: Kemijski sastav čelika K110

ELEMENT	C	Si	Mn	Cr	V	W
%	2,03	0,39	0,32	11,49	0,11	0,78

Kako bi se osigurala prionjivost prevlake potrebno je prije postupka prevlačenja kvalitetno očistiti površinu obrađivanog materijala. U konkretnom slučaju upotrebe čelika K110, površina radnog komada je zasićena Cr-oksidi koji otežavaju prionjivost slojeva prevlake. Kako bi se površina očistila i eliminirali Cr-oksidi provodi se proces čišćenja u plazmi djelovanjem atoma H_2 i N_2 koji se naziva sputtering.

Prije početka postupka prevlačenja na oba uzorka nanescena je osnovna podloga TiN. Nanošenjem osnovne podloge TiN osigurava se najbolja prionjivost na osnovni materijal. Postupak nanošenja podloge TiN je prema uputama proizvođača uređaja.

Parametri nanošenja osnovne prevlake TiN:

- trajanje prevlačenja - 1,5h,
- temperatura prevlačenja - $\vartheta = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- tlak prevlačenja - $p=2\text{ mbar}$.

Konačni slojevi prevlačenja oba uzorka sa svojim parametrima prikazani u Tablici 2.

Tablica 2: Prikaz parametara prevlačenja uzoraka

UZORAK	D2	D3
PARAMETRI POSTUPKA	Prevlaka TiCN $\vartheta = 500^{\circ}\text{C}$ $t= 6,5\text{ h}$ $p= 2\text{ mbar}$	Prevlaka TiBN $\vartheta = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t= 7\text{ h}$ $p= 2\text{ mbar}$

6.3. Mjerenje debljine prevlake primjenom kalotesta

Primjenom postupaka prevlačenja PACVD metodom dobivaju se prevlake čije se debljine mjere u nekoliko μm . Kako bi se olakšao postupak mjerenja debljina nanešenih slojeva koristi se uređaj koji se naziva kalotester koji je prikazan na slici 14. Upotreba kalotestera je jednostavna te oprema ne zahtjeva velike financijske izdatke.



Slika 15: Kalotester za mjerenje debljine slojeva prevlake

6.4. Princip rada kalotestera

Princip rada je zasnovan na sferičnoj kugli zadanog dijametra koja pritiskom i rotacijom pri željenom broju okretaja u kontaktu sa površinom radnog komada troši prevlaku. Nakon određenog vremenskog trajanja rotacije proces se prekida i na radnom komadu nastaje trošenje u obliku kalote. Dimenzije kalote se mjere i pomoću zadane formule računa se debljina prevlake. Mjerenje dimenzija kalote prikazano je na slici 15.

Preciznost mjerenja ovisi o nekoliko faktora od kojih su najbitniji hrapavost površine, svojstva mikroskopa, način izvođenja mjerenja, kontrast prevlaka.

Sferične kugle koje se koriste pri primjeni kalotesta su različitih dimenzija. Kalotester dolazi sa 4 kugle različitih dimenzija. To su \varnothing 10, 15, 20, 25,4 ,30 mm. Upotrebom kugle većih dimenzija povećava se preciznost mjerenja. Kako bi se poboljšala abrazivnost pri provođenju procesa mjerenja sferična kugla se podmazuje dijamantnom emulzijom. Upotrebljavati se mogu dvije vrste dijamantne emulzije koje ovise o veličini dijamantnih čestica.

Vrste dijamantne emulzije:

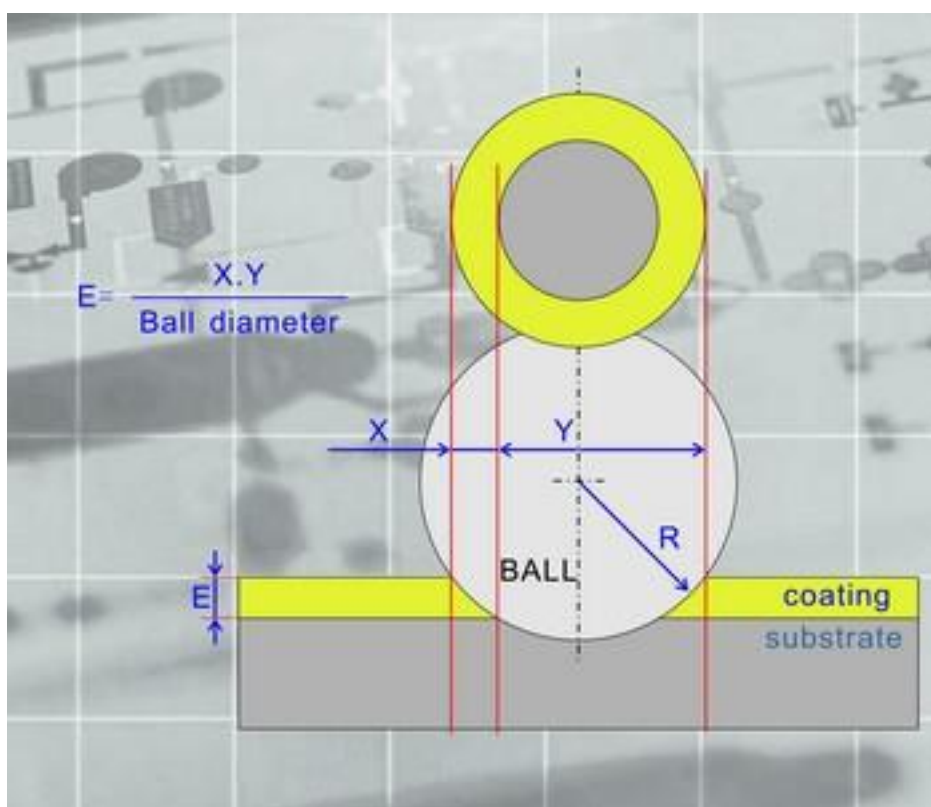
- visoko kvalitetna emulzija - $0.5-1 \mu\text{m}$,
- najviša kvaliteta emulzije - $<0,2 \mu\text{m}$.



Slika 16: Mjerenje debljine prevlake

6.5. Izračun i rezultati mjerenja debljine prevlake

Nakon namještanja radnog komada i sferične kugle počinje proces mjerenja. Vrtanja glavne osovine koja je zadužena za okretanje sferične kugle je regulirana brojem okretaja koji je unaprijed određen. Nakon izvršenog mjerenja na radnom komadu nastaje kalota. Pomoću optičkog mikroskopa koji se nalazi na samome kalotesteru mjere se dimenzije kalote. Dimenzije kalote izražavaju se u X i Y mjerama pomoću skale na optičkom mikroskopu. Na slici 16. je prikazan način mjerenja kalote. Koristeći se određenom formulom (1.1) i uvrštavanjem izmjerenih X i Y koordinata dobivamo vrijednost debljine sloja prevlake [25].



Slika 17: Prikaz načina izračuna debljine prevlake [25]

Debljina prevlake izračunava se pomoću formulacije:

$$E = \frac{X \cdot Y}{D} [\mu\text{m}] \quad (1.1)$$

Rezultati mjerenja debljina prevlaka dobivenih postupkom PACVD prevlačenja prikazani u tablici 3.

Tablica 3: Debljine prevlaka dobivene postupkom prevlačenja

D2 (TiCN)		D3 (TiBN)	
MJERENJE	DEBLJINA PREVLAKE [μm]	MJERENJE	DEBLJINA PREVLAKE [μm]
1.	3,1	1.	3,2
2.	3,2	2.	3,4
SREDNJA VRIJEDNOST	3,1 [μm]	SREDNJA VRIJEDNOST	3,3 [μm]

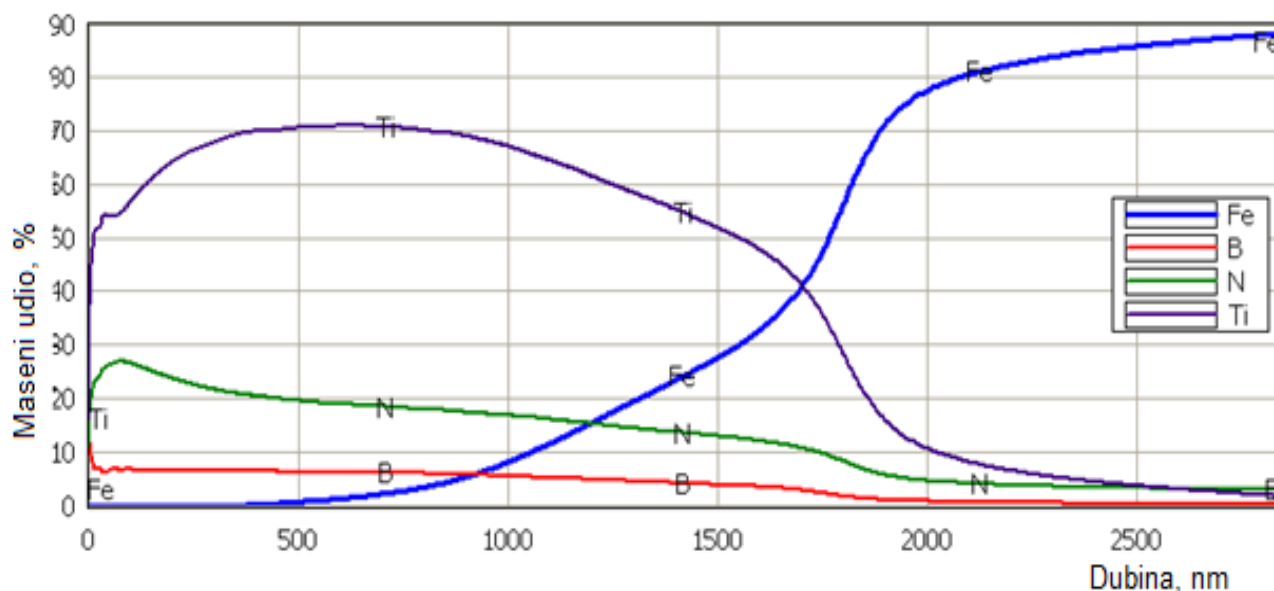
6.6. Kvantitativna kemijska analiza GDOES metodom

GDOES-eng., Glow Discharge Optical Emission Spectrometry

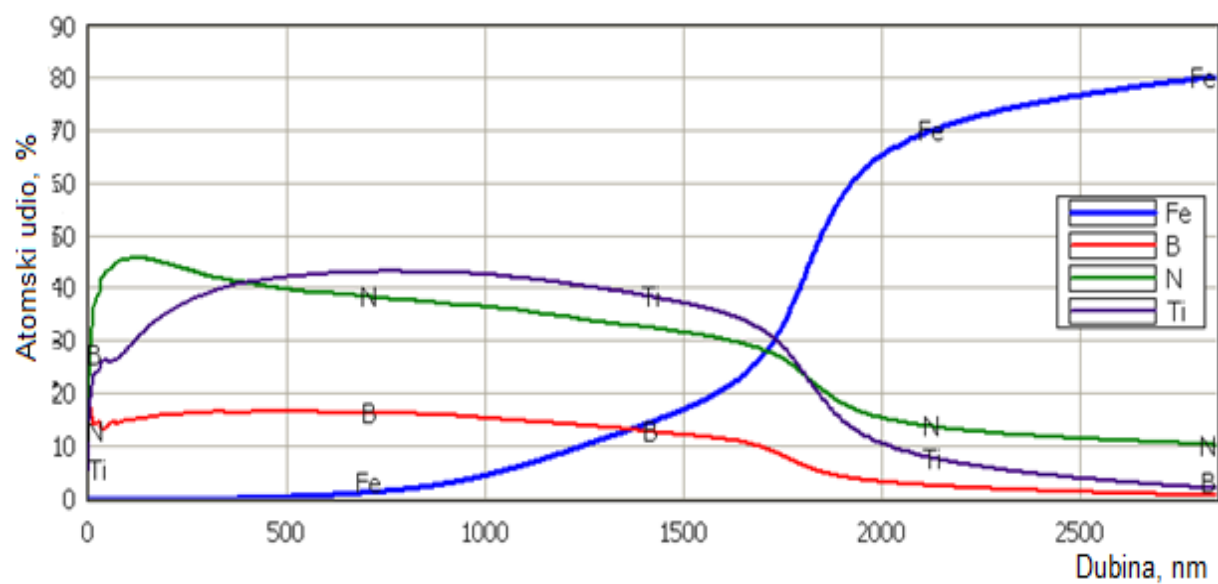
Brza i jednostavna metoda koja služi za mjerenje kemijskog sastava sloja po dubini prevlake uzorka pomoću metode emisijske spektrometrije.

GDOES metoda koristi niski tlak bez temperaturnog opterećenja prilikom čega na površinu radnog komada jednoliko nastrujavaju ioni argona. Katodno prskanje površine radnog komada otklanja sloj po sloj sa površine uzorka bez neželjenih promjena uzrokovanih topljenjem, selektivnim isparavanjem, oksidacijom i ponovnim skrućivanjem. Uzbuda atoma odvija se u ispuštenoj plazmi diskretno od površine uzorka.

Primjenom GDOES metode određuje se raspored pojedinih elemenata po sloju dubine uzorka kao i kvantitativna analiza sastava materijala. Prednosti upotrebe GDOES metode su visoka dubina rezolucije, brzo i jednostavno mjerenje, efikasnost mjerenja i analize površine uzorka. Debljina prevlake za mjerenje ovom metodom mora biti veća $> 0,1 \mu\text{m}$. Na slikama 17 i 18 prikazani su rasporedi masenog i atomskog udjela po dubini uzorka D3.



Slika 18: Raspored masenog udjela elemenata po dubini prevučenog uzorka D3



Slika 19: Raspored atomskog udjela elemenata po dubini prevučenog uzorka D3

7. ZAKLJUČAK

Svakodnevnom upotrebom i primjenom u industriji materijali se podvrgavaju procesima trošenja. Procesi trošenja su svakodnevna pojava i zauzimaju veliku važnost u procesima konstruiranja alata i odabiru materijala. Materijali se odlikuju svojim specifičnim svojstvima koja su za svaki materijal različita te su vrlo bitna prilikom odabira materijala. U svrhu postizanja što boljih svojstava, materijali se podvrgavaju raznim procesima poboljšanja karakteristika materijala. Tehnologije koje se koriste u tim procesima su u stalnom razvoju, kako bi se osigurale što efikasnije i modernije metode koje bi u konačnici dovele do značajnog pomaka u svojstvima i ponašanju materijala u eksploataciji. Neke od tih tehnologija koje svoju sve veću zastupljenost nalaze u raznim industrijama su metode prevlačenja i modificiranja površina. Osnovna odlika tehnologija modificiranja i prevlačenja je postupak nanošenja ili modificiranja površine radnog komada nekim novim elementom u svrhu postizanja željenih svojstava koja prije izvođenja postupka nisu bila ostvariva.

Postupci prevlačenja površina dijele se u četiri glavne skupine. To su postupci prevlačenja PVD, CVD, PACVD i PAPVD postupkom. Primjenom PACVD postupka postiže se nanošenje željenog sloja na površinu radnog komada u svrhu povećanja otpornosti površine, poboljšanja mehaničkih i korozijskih svojstava. Primjena PACVD postupaka prevlačenja je moderna tehnologija koja svoju primjenu nalazi u raznim granama industrije.

U eksperimentalnom dijelu primjenom PACVD metode prevlačenja obrađen je kalup za injekcijsko prešanje polimernih materijala. Kalup je izrađen od čelika X210CrW12 čija je radna temperatura iznosi $\vartheta = 200^{\circ}\text{C}$. U ispitivanju su korištena dva uzorka koja su prevučena PACVD metodom sa dva različita sloja. Prvi uzorak D2 je prevučen slojem TiCN, dok je uzorak D3 prevučen slojem TiBN. Postupci prevlačenja provedeni su sa svrhom poboljšanja otpornosti trošenja kalupa s glavnim ciljem poboljšanja trajnosti i vijeka trajanja kalupa. Primjenom kalotestera izmjerene su debljine prevlaka $E_{D2} = 3,1 \mu\text{m}$ i $E_{D3} = 3,3 \mu\text{m}$. Upotrebom GDOES metode dobiven je prikaz raspodjele atomskih i masenih udjela po dubini prevučenog sloja. Prevučeni dijelovi su u svrhu pogonskih ispitivanja ugrađeni u kalupe u firmi Elektro-kontakt d.d.. Podvrgnuti su pogonskom ispitivanju od 10.625,00 ciklusa odnosno 85.000,00 komada. Nakon provođenja pogonskih ispitivanja prevučeni umetci kalupa nisu pokazali znakove trošenja no dio uljevnice kalupa pokazuje vidljive znakove trošenja.

8. LITERATURA

- [1] V. Leskovšek, B. Podgornik, M. Jenko; Wear, A PACVD coating for hot-forging applications; Institute of metal and technology, Ljubljana 2009, str 453-460.
- [2] Yucong Wang; A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting life; Surface & Coatings Technology; GM Powertrain Group, General Motors Corporation, Saginaw; 1997, str 60-63.
- [3] CVD coatings and gas quenching of carburized steel; International development, Advanced Material & Processes; October 2000, str 29-31.
- [4] A.Wells, S.C. Yates; Chemical vapour deposition of titanium nitride on plasma nitrided steel; Metals Division, National Institute for Material research, Council for Scientist and Industrial Research, Pretoria South Africa, Journal of Materials Science, str 1481-1485
- [5] M. Stupnišek, B. Matijević; Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala; Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb, 2000.
- [6] J. Vetter, T. Michler, H. Steuernagel ; Hard coatings on thermochemically pretreated soft steels: application potential for ball valves; Surface and Coatings Technology 1998. Str 210-219
- [7] T. Filetin, K. Grilec; Postupci modificiranja i prevlačenja površina; Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [8] Primjena prevlaka u industriji, smanjenje troškova i povećanje životnog vijeka; Titan Sisak
- [9] Hermann A. Jehn; PVD and ECD-competition, alternative or combination; Surface & Coatings Technology, 1999, str 210-216.
- [10] C. Friedrich, G. Berg, J. Senf, E. Broszeit; Reliable PVD coatings on components: aspects of deposition and characterization for quality management, Surface & Coatings Technology, 1999, str. 152-161.
- [11] T. Filetin, V. Ivušić; Tribologija, FSB, Zagreb, 2011.
- [12] D. Landek; Podloge za vježbe, kolegij Toplinska obrada, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb 2013.
- [13] A. Rogić, I. Čatić, D. Godec; Polimeri i polimerne tvorevine, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2008.

- [14] B.Bauer; Podloge za vježbe iz kolegija „Tehnologija 1“, dio „Ljevarstvo“, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [15] A. Rogić, I. Čatić; Injekcijsko prešanje polimera, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1996.
- [16] http://www.ist.fraunhofer.de/en/technologies/low_pressure_plasma_processes/pa-cvd-verfahren.html
- [17] http://www.rutlandplastics.co.uk/advice/moulding_machine.html
- [18] <http://machinedesign.com/materials/how-3d-print-plastic-molds-and-tooling>
- [19] <http://www.made-in-zelenograd.com/products/vacuum-plasma-equipment/>
- [20] <http://www.rubig.com/index.cfm?seite=beschichtungen-ht&sprache=EN>
- [21] http://www.kenosistec.com/en/product_card.php?id=11&categoria=2
- [22] <http://www.tincoat.net/TiCN.html>
- [23] <http://www.sulzer.com/en/Newsroom/Business-News/2013/130731-New-DLC-Coating-Helps-Achieve-EU6-Emission-Limit>
- [24] <http://www.richterprecision.com/dlc-coatings.html>
- [25] <http://www.kemet.co.uk/uploads/downloads/Calotest.pdf>